



# 用常规粉末冶金工艺制造汽车连杆

韩凤麟\*

(中国机械工程学会粉末冶金专业协会 100044)

**摘要** 汽车中使用粉末冶金连杆已有十几年。迄今为止,都是用粉末锻造工艺生产的。粉末锻造工艺比较昂贵,较适合于小批量生产,或制造高负荷与高速发动机的连杆。对于大批量生产的,速度不高于 7000rpm 的 2.0L 以下的发动机的连杆,可用较经济的压制-烧结-精整-热处理工艺和“断裂剖分法”制造。在欧共体 COST 503 计划中,瑞典、英国和德国的汽车制造厂、粉末生产厂、粉末冶金零件生产厂及高等学校共同承担了二个合作开发项目,旨在用上述工艺制造重量最佳的,在 1.8/2.0l OHC 发动机中工作可靠的连杆。研究表明,用上述工艺制造的二种烧结钢连杆都已达到了现在生产的铸造连杆的疲劳强度,在发动机中工作可靠。

**主题词** 一次烧结 连杆

## 1 前言

轻量化是汽车发展的一个主要目标。连杆是汽车发动机中承受动态应力最高的主要运动零件。减轻连杆重量对发动机的运转,燃料消耗及发动机零件的机械应力都有良好影响。制造工艺和材料的改进,以及采用新工艺、新材料,虽然都有助于减轻连杆重量,但是,对于连杆这种大批量生产的零件,只有经济效益好的生产方法或新材料、新工艺才会获得工业应用。

根据文献〔1〕,全世界所有主要汽车制造厂每年需要连杆 2 亿根左右,其中 87.4% 为锻造连杆。60 年代中期,珠光体可锻铸铁 (GTS-65) 连杆由 GM 首先用于汽车。德国铸造行业每年供给欧洲汽车制造工业 1000

万根铸铁连杆,德国 OPEL 汽车制造公司是铸铁连杆的最大用户之一。

1974 年以来,德国 Porsche 公司在一标准系列汽车中使用了粉末锻造连杆。日本丰田汽车制造公司 80 年代初开始生产和使用粉末锻造连杆;据 1992 年信息,年产粉末锻造连杆约 250 万根。丰田最好的车型“Lexus”都装用了粉末锻造连杆。美国 Ford 汽车公司从 1987 年开始大量采用粉末锻造连杆;据 1992 年信息,一年使用近 400 万根粉末锻造连杆。1991 年,德国 BMW 公司开始在其新的 8 缸发动机中使用粉末锻造连杆,年用量约 65 万根。

密度高于  $7.0\text{g}/\text{cm}^3$  的常规烧结钢,其疲劳强度接近于有凹口的铸钢试件,铸造连杆

\* 中国机协粉末冶金专业分会和中国钢协粉末冶金协会顾问,北京科技大学兼职教授。

收稿日期:1996. 3. 18

成功地取代了部分锻造连杆,特别是烧结钢的力学性能和铸铁相似,这些都激发了人们研制用常规粉末冶金法(即一次烧结法)制造烧结钢连杆的兴趣。

关于经济方面,Ford汽车公司和德国-Sintermetallwerk Krebsöge GmbH共同对一种新开发的发动机用的,以不同方法制造的连杆的重量和造价进行了研究,见表1。这项研究以1987年铸造连杆的造价与重量为基准。

由表1可看出,从经济方面来看,对连杆大批量生产具有现实意义的制造工艺是,铸造、模锻、粉末锻造及常规粉末冶金工艺。

就粉末锻造与常规粉末冶金工艺而言,两者造价相同,但后者比前者的重量约高32%。因此,只要后者的重量能逐步减小,其技术-经济效益将明显优于前者。温压技术<sup>[2]</sup>的出现,将大大加快用常规粉末冶金工艺制造连杆的工业化进程。

表1 连杆在造价与重量方面的改进<sup>[1]</sup>

年		1987	1988	1989	1990	1991	1992
铸造	[%] <sup>①</sup>	100	—	—	90	—	—
	[g] <sup>②</sup>	540	—	—	540	—	—
模锻	[%] <sup>①</sup>	120	120	—	120	—	—
	[g] <sup>②</sup>	580	550	—	500	—	—
粉末锻造	[%] <sup>①</sup>	130	120	120	—	80	—
	[g] <sup>②</sup>	515	480	460	—	440	—
常规粉末冶金工艺	[%] <sup>①</sup>	130	—	100	—	80	—
	[g] <sup>②</sup>	650	—	600	—	580	—
铝合金	[%] <sup>①</sup>	500	—	—	—	—	300
	[g] <sup>②</sup>	300	—	—	—	—	280
碳纤维	[%] <sup>①</sup>	800	—	—	—	—	400
	[g] <sup>②</sup>	280	—	—	—	—	260

注:①——连杆成品的造价(铸造者=100%)

②——连杆重量。

## 2 用常规粉末冶金工艺制造连杆

Shigeru Suzuki等<sup>[3]</sup>首先报导了用常规粉末冶金工艺制造汽车发动机连杆。他们用有限元应力分析确定了烧结态连杆的合适形状。用油雾化SUMIRON 4100S粉添加0.8%石墨粉与0.8%硬脂酸锌的混合粉,压制成密度7.0g/cm<sup>3</sup>的压坯,于1250℃下真空烧结60min在N<sub>2</sub>气中冷却到室温之后,将烧结坯切削加工成连杆试件。烧结态连杆的重量约为锻造连杆的115%,其化学组成见表2。轴向疲劳试验表明,烧结态连杆具有足够高的疲劳强度。

表2 烧结态连杆的化学组成<sup>[3]</sup>

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.73	0.02	0.73	0.008	0.052	0.95	0.23

鉴于粉末锻造连杆生产费用较高,德国的Adam Opel AG、Sintermetallwerk Krebsöge GmbH(SMK)/Metallwerk、Unterfranken GmbH(MWU)/Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit(LFB)、英国的GKN Technology Ltd(GKN)/Bound Brook Ltd(BB)和瑞典的Höganäs AB共同承担了欧洲共同体COST 503计划中用传统粉末冶金工艺(压制-烧结-精整)制造速度不高于7000rpm的1.8/2.0L OHC发动机连杆的二个铁基粉末冶金研制项目。项目分两期进行,第一期为1985~1988年,第二期为1989~1991年。这种发动机现在使用的是重560g的铸铁连杆。连杆的设计数据: $n_{max}=6400\text{rpm}$ , $P_{max}=55\text{bar}$ 。连杆的开发步骤与分工见图1。

### 2.1 连杆设计

连杆的初步设计是根据发动机的负荷、转速、配合尺寸及连杆的整体尺寸,几种烧结钢的疲劳强度数据及应力集中系数等,经有限元计算作出的。有限元计算是基于<sup>[4]</sup>:

1. 依据 OPEL 提供的数据,发动机的计算的工作负荷为  $F_{cal} = -14.20 \pm 26.46 \text{KN}$ ;

2. 最低密度为  $7.05 \text{g/cm}^3$  的烧结 Fe-1.5Cu-0.6C 合金,其淬火-回火态在  $10^8$  周次下耐久极限  $\sigma = 184 \text{MPa}$  (无凹口状态),和存活率为 99.99%。

根据初步设计,和 Fe-1.5Cu-0.5C 合金烧结坯中切割的连杆试件进一步进行试验分析的结果,借有限元计算进行了最终设计,从

而确定了连杆的最终形状。烧结 Fe-1.5Cu-0.5C 合金连杆最高材料密度为  $7.2 \text{g/cm}^3$ ,重量为 606g,虽比现在使用的铸铁连杆重量 (560g) 稍高一点,但摆动质量相同。

## 2.2 材料选择

在 COST 503 计划中第一个项目的研究重点是;以 Fe+1.5%Cu+0.5%C 混合粉为原料粉,用压制-烧结-精整-热处理工艺制造连杆;在连杆疲劳失效敏感区的材料密度不得小于  $7.0 \text{g/cm}^3$ ;探索应力分布的最佳设计、材料的性状与制造。研制的烧结钢疲劳强度至少要达到铸造连杆的水平。

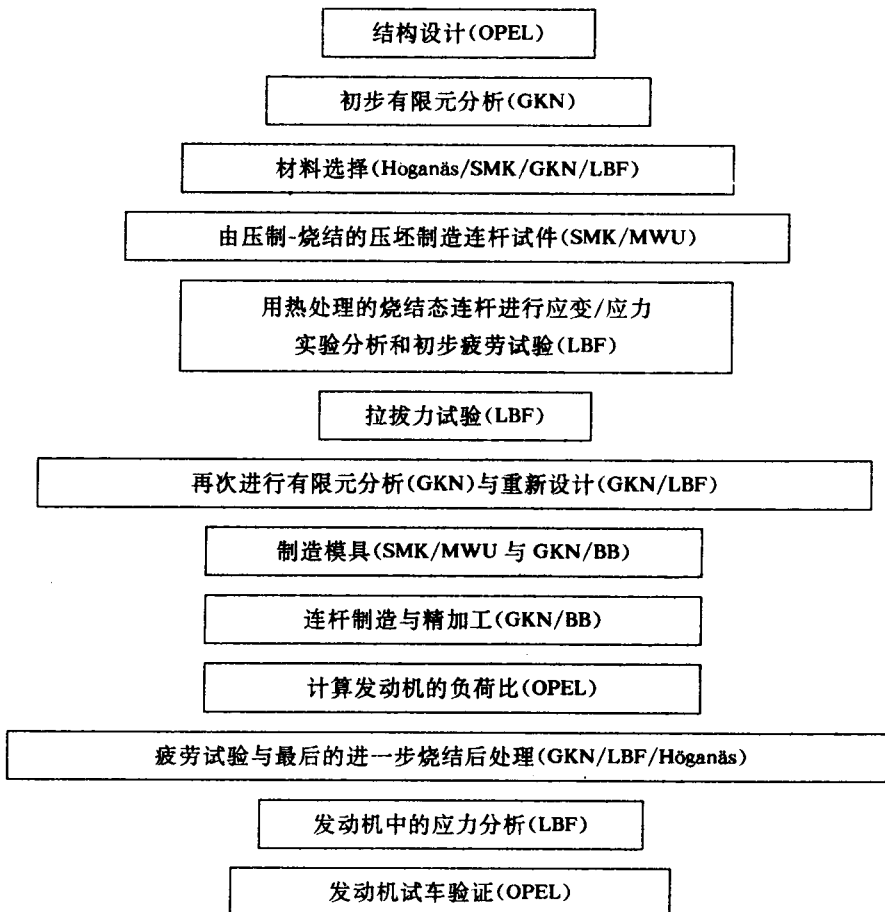


图 1 用常规粉末冶金工艺制造汽车连杆的开发步骤<sup>[4]</sup>

在第二个研究项目中,为增高材料的疲劳强度和改善材料的切削加工性能、密度分布、尺寸稳定性等,改为以 Distaloy AB (Fe-1.75%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo)+0.5%C+0.7%Kenolube (润滑剂)的混合粉为原料粉,用压制-烧结-精整-热处理工艺制造连杆。为改善烧结钢的切削加工性能,混合粉中还添加了0.5%MnS。MnS是用二种方法加入的,一是将0.5%MnS混合于原料粉中,使之均匀分布于整个连杆中,一为采用“二次装粉”工艺,仅只在连杆大头部分添加了0.5%MnS,在杆柄与小头部分不含有MnS。

表3列出了研制的铁基粉末冶金材料的生产参数<sup>[5]</sup>。

由研制的二种烧结钢和用二种装粉工艺制造的烧结连杆的密度分布见图2。可看出,由Fe+1.5%Cu+0.5%C混合粉制造的, MnS均匀分布的烧结连杆,其密度分布和Fe+1.5%Cu+0.5%C混合粉制造的制造的相似,最高密度7.29g/cm<sup>3</sup>(焊柄部分),最低密度6.78g/cm<sup>3</sup>(轴承盖部分)。只有用“二次装粉”工艺制造的连杆,在未添加MnS的杆柄部分密度较高,最高达到了7.42g/cm<sup>3</sup>,见图2。

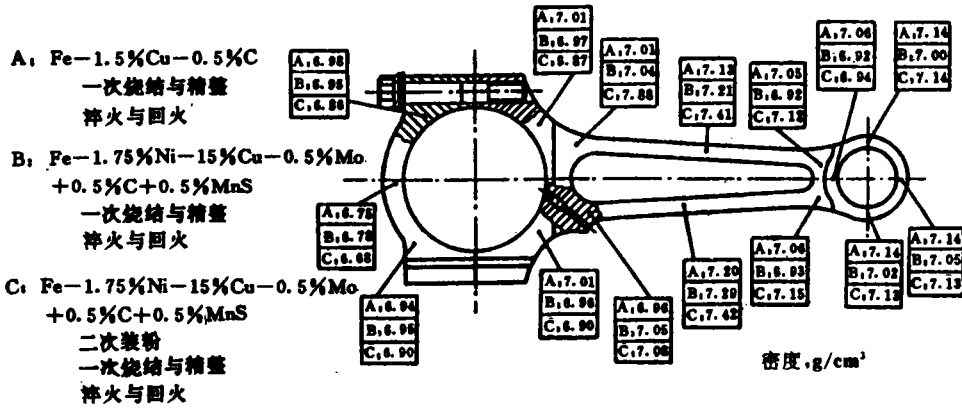


图2 烧结连杆的密度分布<sup>[5]</sup>

表3 研制的铁基粉末冶金材料的生产参数<sup>[5]</sup>

一、材料:Fe+1.5%Cu+0.5%C混合粉	
• 压制-烧结-精整	• 热处理
烧结温度:1150℃	奥氏体比:850℃/45min
烧结时间:40min	淬火:60℃/油
	回火:430℃/1h

二、材料:Distaloy AB(Fe-1.75%Ni-1.5%Cu-0.5%Mo)粉末

• 混合粉

A——Distaloy AB+0.5%C+0.5%MnS

B——Distaloy AB+0.55%C+0.5%MnS

C——Distaloy AB+0.5%C(未添加MnS)

D——Distaloy AB+0.55%C(未添加MnS)

• 连杆

- 1 批——混合粉 A, 压制-烧结-精整  
 3 批——混合粉 B, 压制-预烧结-复压-烧结  
 5 批\*——混合粉 B+混合粉 D(杆柄部分), 压制-预烧结-复压-烧结  
 6 批\*——混合粉 A+混合粉 C(杆柄部分), 压制-烧结-精整

• 烧结参数

1 批与 6 批:

一次烧结

烧结温度: 1120℃

烧结时间: 30min

烧结气氛: 吸热性煤气  
+0.18%CO<sub>2</sub>

3 批与 5 批:

二次烧结

①预烧温度: 900℃

预烧时间—30min

烧结气氛: 吸热性煤气

②烧结温度: 1280℃

烧结时间—40min

烧结气氛: 100%N<sub>2</sub>

• 热处理

奥氏体化: 860℃/45min

淬火: 60℃/油

回火: 300℃/60min(250℃/60min)

\* ——“二次装粉”工艺

### 2.3 回火处理

为获得疲劳强度高, 切削加工性能好, 适于制造连杆之类重载有凹口零件的材质, 研究了由 Distaloy AB+0.5%C+0.5%MnS+0.7%Kenolube(润滑剂)混合粉制造的烧结钢的淬火-回火处理。试样在 1120℃于吸热性煤气保护气氛中烧结 30min, 其密度为 7.1

±0.05g/cm<sup>3</sup>。将奥氏体化温度固定为 860℃, 研究了三种回火温度(250℃、300℃及 350℃)的影响。表 4 列出了烧结态与热处理态烧结钢的力学性能, 可看出, 烧结钢的拉伸强度与硬度皆随回火温度升高而减低, 但伸长率增大。

表 4 烧结钢的制造参数与力学性能<sup>(6)</sup>

	回火温度 (℃)	$\sigma_b$ (MPa)	$\delta$ (%)	硬 度 HB2.5/187.5	度 HV <sub>20</sub>
烧结态(1120℃, 30min, 吸热性煤气)		570	3.0	172	
(860℃奥氏体化	250℃	970	0.9	351	405
热处理态 →60℃油淬	300℃	940	1.1	321	365
→回火)	350℃	910	1.3	306	325

烧结钢淬火与回火后的显微组织由 Fe-C 马氏体和围绕它们的低碳含 Ni 马氏体组成, 残留奥氏体不大于 2%。随着回火温度升高, Fe-C 马氏体的显微硬度减低。在 250℃、300℃及 350℃回火的烧结钢, 其 HV<sub>0.02</sub>分别为 640、550 及 455, 而它们的低碳含 Ni 马氏体的显微硬度都比 Fe-C 马氏体低, 约为 350HV<sub>0.02</sub>。

切削加工性能与疲劳试验表明, 随着回

火温度升高, 烧结钢的耐久极限减小, 切削加工性能有所改善。于 300℃回火时, 烧结钢的疲劳强度高, 切削加工性能较好, 见图 3。

### 2.4 应力分析

用有限元计算对连杆形状设计进行了最终验证。应力分析是用连杆试件在疲劳试验装置中进行的<sup>(7)</sup>。在负荷幅为  $F_a = 19.2\text{kN}$  的发动机计算负荷, 和在发动机的最高负荷下

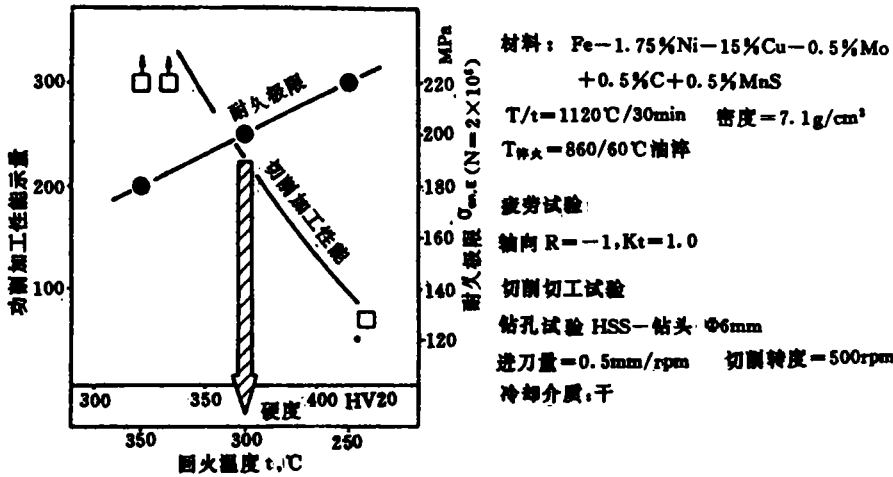


图3 回火温度与耐久极限及切削加工性能的关系<sup>6)</sup>

进行了应力分析。小头、杆柄及大头的应力比 ( $R_F = F_{min}/F_{max}$ ) 分别为 -1.80、-1.26 及 -0.42。测量的应力证实了有限元计算的结果。

157GPa)。油孔区的局部应力比测定的杆柄的标称应力约高一倍。计算疲劳强度时,平均压缩应力须计算在内。

为进行发动机中的应力分析,必须测定

由于组装、偏心率、曲轴与曲轴箱壁变形导致的无法计算的弯曲应力。为此,另外制备了连杆试件。在杆柄中部放置了8个应变仪。试验装置是一台1.8/2.0l OHC发动机和一台用油泵模拟气体压力的装置。在曲轴的不同位置和气缸中测量了应力。无法测定不同位置与气缸的影响,图5示在模拟气体压力600kPa(60bar)下,在活塞顶端测定的应变。弯曲应力小于轴向应力的10%。可是,一般模锻或铸造的连杆的经验表明,附加弯曲应力和计算的轴向应力为同一数量级,见图6。烧结连杆的附加弯曲应力值很小是设计稳定所致。它表明, OPEL对连杆材质规定安全系数为0.60,主要是根据模锻与铸造连杆的经验和考虑到大量的无法计算的弯曲应力,对于烧结连杆可予以修正。这里所讲的安全系数,它的定义是计算的负荷幅  $F_{a,cal}$  对于  $4 \times 10^6$  周次下的耐久负荷幅  $F_{a,90\%}$  之比。  $F_{a,90\%}$  是于存活率  $P_s = 90\%$  下根据疲劳试验确定的。

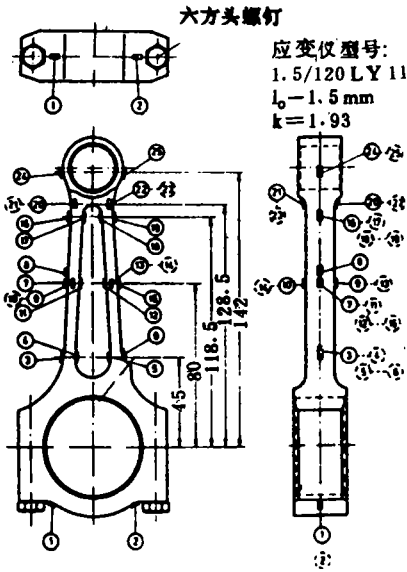


图4 连杆上应变仪的位置<sup>7)</sup>

最高应力区位于杆柄与大头和杆柄与小头之间的过渡区。测量的最高应力幅位于点3处(见图4),负荷幅为19.2kN时约等于140MPa。在杆柄区轴向应力幅约为100MPa(为进行应力计算,测定的杨氏模量  $E =$

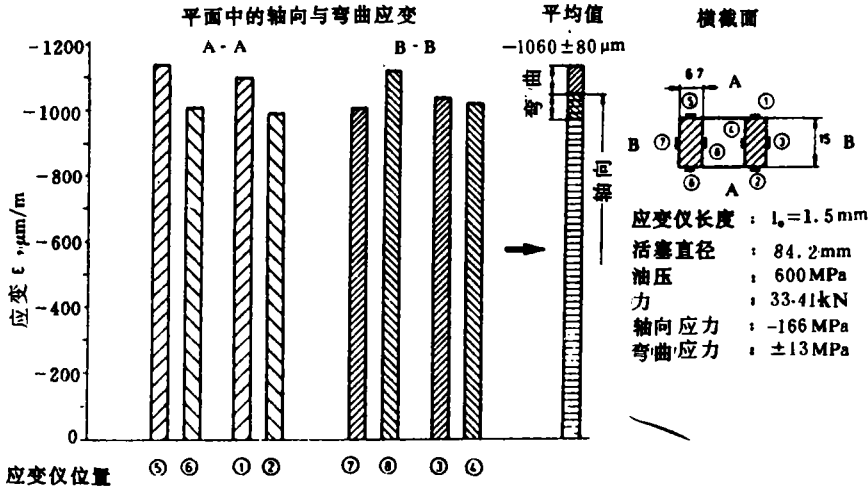


图5 位于顶端的模拟气体压力对轴中应变的影响<sup>[7]</sup>

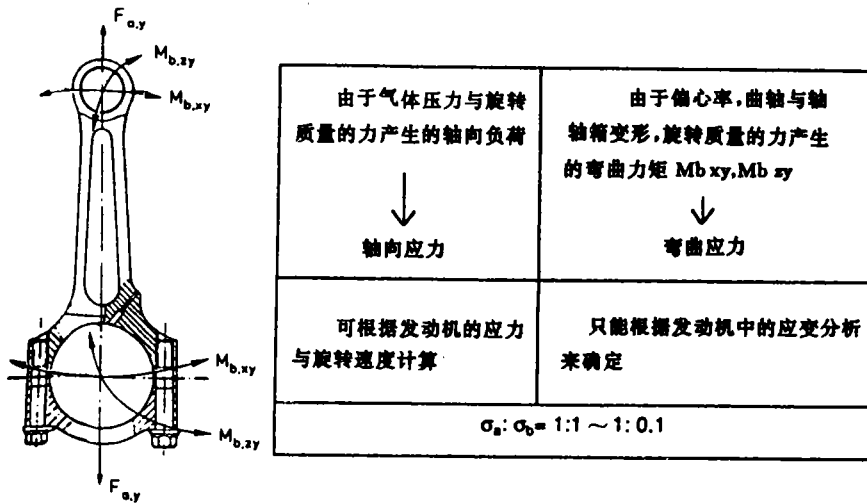


图6 连杆的应力源<sup>[7]</sup>

2.5 疲劳试验

在伺服液压试验台上,于增大的负荷下进行了疲劳试验,负荷是通过活塞销和用作曲轴轴承销替代件的轴承插销在轴向传递给连杆的。

由烧结 Fe-1.5%Cu-0.5%C 合金制造的,密度为 6.8~7.2g/cm<sup>3</sup>,回火温度为 430℃的连杆,其疲劳试验结果以 S-N 曲线

示于图 7。在  $4 \times 10^6$  周次下,计算的安全系数 0.65 超过了规定的安全系数 0.60 约 8%。鉴于烧结连杆附加的弯曲应力低,较大的安全系数是容许的,因此疲劳试验后,可在 OPEL 直接进行发动机试车。

图 7 中还给出了用 6 个经喷丸处理的试件试验的结果。喷丸处理赋予的 Almen 强度为  $A_2 = 0.40\text{mmA}$  与  $0.65\text{mmA}$ 。一些试验表

明,经喷丸处理的连杆的疲劳强度比淬火-回火处理的增高了 20%左右,安全系数可达到

0.55 左右,小于规定的 0.60。试验证明,喷丸处理仅只有助于增高杆柄的疲劳强度。

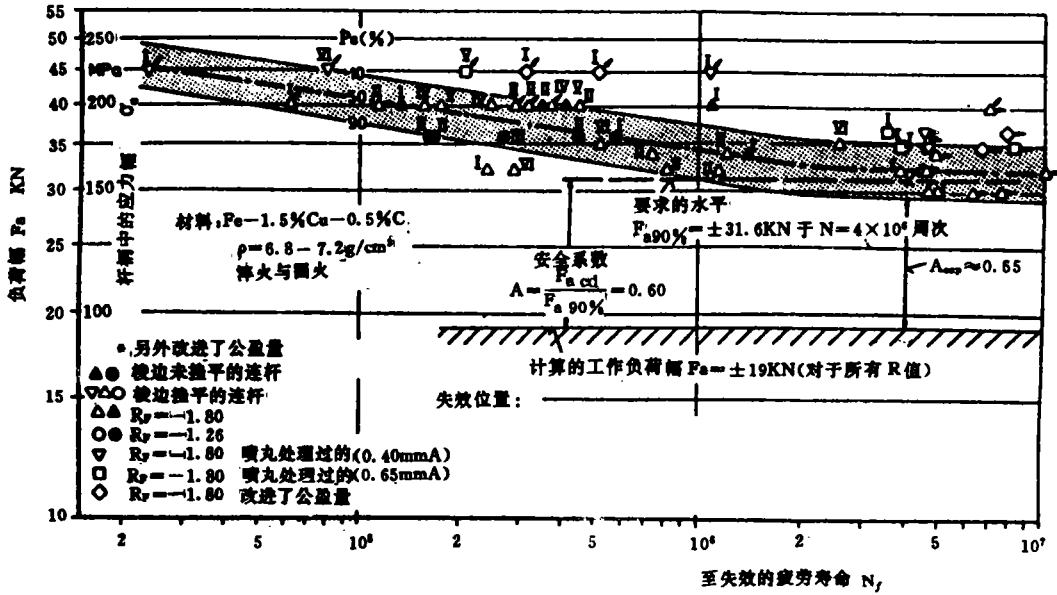


图 7 烧结 Fe-1.5Cu-0.5C 合金连杆的疲劳试验结果

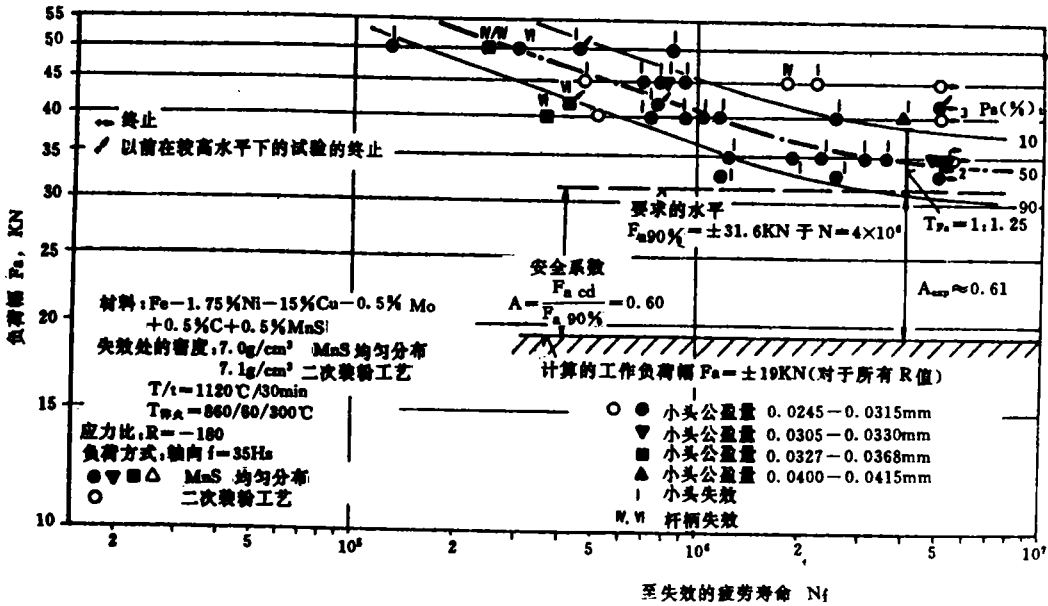


图 8 烧结钢连杆的疲劳试验结果



由 Distaloy AB+0.5%C+0.5%MnS 混合粉制造、于 300℃回火、小头孔与活塞销间压配过盈量不同的烧结连杆的疲劳试验结果示于图 8。其安全系数为 0.61,差不多已达到了要求的 0.60。用“二次装粉”工艺制造的比 MnS 均匀分布者承受的负荷幅稍大些。大部分裂纹都是由于微振腐蚀发生在连杆小头。活塞销的压配过盈量增大时,裂纹越来越移

向杆柄与大头间的过渡区。

在  $4 \times 10^6$  周次下,由 Distaloy AB + 0.5%C+0.5%MnS 混合粉制造的烧结连杆,其疲劳强度仅稍高于由 Fe+1.5%Cu+0.5%C 混合粉制造的连杆。可是,烧结连杆疲劳强度性能和现在使用的最好的铸造连杆相同(图 9)。

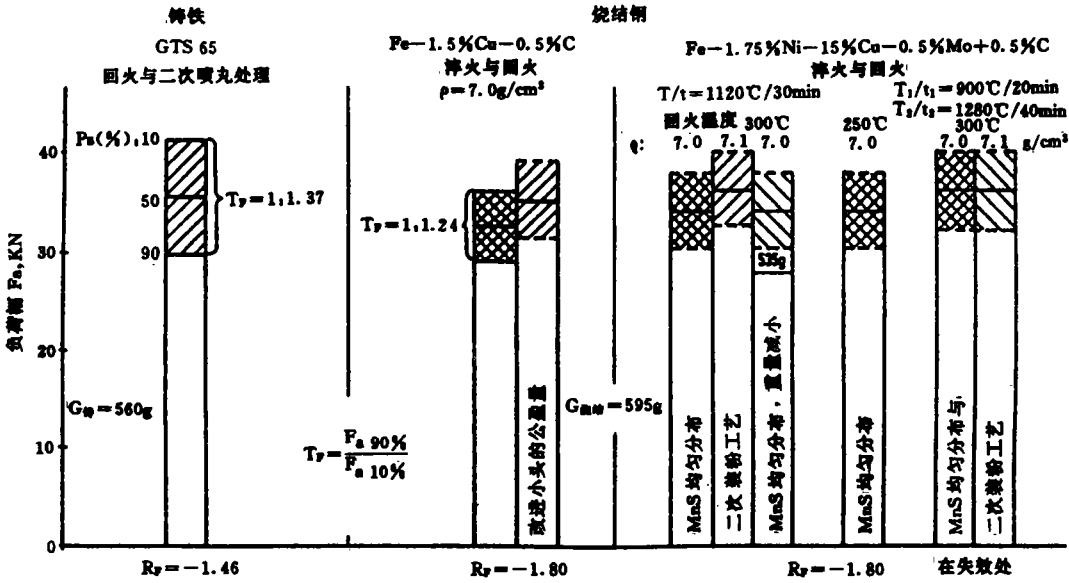


图 9 用于 1.8/2.0l OHC 发动机的连杆于  $N=4 \times 10^6$  周次下的疲劳强度<sup>(5)</sup>

### 2.6 发动机试车

由 Fe+1.5%Cu+0.5%C 混合粉和由 Distaloy AB+0.5%C+0.5%MnS 混合粉,用压制-烧结-精整-热处理工艺制造的连杆,都在 OPEL 2.0l OHC 发动机上进行了试车。试车采用了 9 种不同负荷水平的严格分段时序试验(图 10)。时序长度 47min,要求总的试验时间 460h,时序循环 587 次。这相当于在极端条件下试验运行 55000km。依据驱动类型,这相当于在欧洲行驶了 150,000~300,000 km。由二种烧结钢制造的连杆都完成了试验计划,没有失效。烧结连杆从发动机上取下后,经过详细检验,既没有发现裂纹。轴承磨损也不大,同时没有发现其它不正常现象。

OPEL 现在在 1.8/2.0l OHC 发动机中使用的铸造连杆重 560g。由 Distaloy AB+0.5C+0.5%MnS 混合粉,用一次烧结工艺制造的,经淬火与 300℃回火的连杆,按照现在的形状,重量为 595g。连杆大头与杆柄部分都存在减小重量的可能性。

将二根烧结连杆杆柄的厚度减薄了 1.2 mm(相当于横截面减小了 20%),从而使连杆的重量减轻了约 60g,即从 595g 减小到了 535g(见表 5)。将重量减小的烧结连杆在重量未减小的烧结连杆的负荷水平下进行了疲劳试验,在疲劳极限范围内未发现任何失效。在较高负荷水平下,如同所预期的,在连杆杆柄部分产生了裂纹。

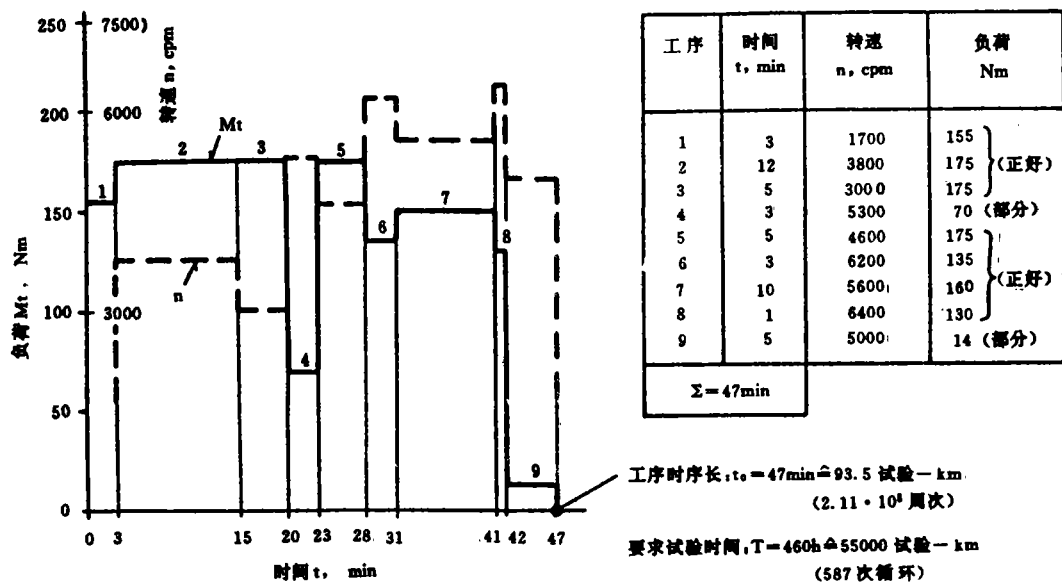


图 10 烧结连杆发动机试车的负荷时序<sup>[5]</sup>

表 5 铸造与烧结连杆重量的比较<sup>[5]</sup>

零件名称	铸造的 <sup>+</sup>	烧结的 <sup>++</sup>	烧结的 <sup>+++</sup>	
			重量减小前	重量减小后
连杆	560g(100%)	606g(108%)	595(106%)	535(96%)
螺 钉	55g(M9×50)	39g(M8×45)	39g(M8×45)	39g(M8×45)
活塞肖	105g	105g	105g	105g
轴承衬套	32g	32g	32g	32g
合 计	752g	782g	771g	711g

+——材料 GTS65, 回火与二次喷丸硬化。

++——材料 Fe+1.5%Cu+0.5%C, 淬火-回火,  $\rho = 7.0 \sim 7.1\text{g/cm}^3$ 。

+++——材料 Distaloy AB+0.5%C, 淬火-回火,  $\rho = 7.0 \sim 7.1\text{g/cm}^3$

结束语

根据用压制-烧结-精整-热处理工艺, 由 Fe+1.5%Cu+0.5%C 混合粉和由 Distaloy AB+0.5%C+0.5%MnS 混合粉, 制造汽车发动机连杆的一些 COST 503 的研制报告来看, 用二种烧结钢制造的连杆都已达到了现在生产的铸造连杆的疲劳强度水平。发动机试车表明, 使用可靠。

由 Distaloy AB+0.5%C+0.5%MnS 混

合粉制造的烧结连杆, 其疲劳强度比由 Fe+1.5%Cu+0.5%C 混合粉制造的并没有太大改进。

适当地改进连杆的设计时, 烧结连杆的重量还可进一步减小, 特别是连杆大头重量减小的潜力还很大。

通过高温烧结、随后的喷丸处理及杆柄最佳化, 特别是改用温压工艺生产连杆时, 还可进一步提高疲劳强度。

烧结连杆因重量偏差小,不需要进行重量拣分、平衡作业及库存周转。用“断裂剖分法”可将烧结连杆的切削加工减小到最低限度。

由上述不难看出,烧结连杆的生产与应用已指日可待,其技术-经济效益将十分巨大。

这个由汽车制造厂、铁粉生产厂、粉末冶金零件生产厂、高等学校联合进行的多国合作开发项目,提供了一个如何通过考虑到负荷条件、几何形状结构、应力分析、材料数据、模具及专门试验方法来设计与开发粉末冶金汽车零件的范例,这对粉末冶金零件今后的研制与开发具有相当重要的指导意义。

#### 4 参考文献

- 1 M. Weber. Comparison of advaced procedures and economics for production of connecting rod. PMI, 1993, 25(3): 125~129.
- 2 韩凤麟. ANCORDENSE™温压工艺特性. 粉末冶金技术, 1995, 13(4): 294~302.
- 3 Shigeru, Suzuki, Kazuo Toyama, et al. Development of AS-Sintered P/M Connecting Rods for Automobiles. The International Jouunal of Powder Metallurgy, 1988, 24(3): 243~250.
- 4 C M Sonsion. Fatigue Design of Sintered Connecting Rods. MPR, 1988, 43(5): 332~327.
- 5 K. Richter, E. Hoffman, K Lipp, et al. Single-Sintered Con Rods-an illusion? MPR, 1994, 49(5): 38~45.
- 6 K Lipp, G Straffelini, C. M. Sonsino. Fatigue Resistance and Machinability of a High-Strength Sintered Steel in Dependence on Tempering Temperature. PMI, 1993, 25(6): 261~266.
- 7 C M Sonsion, Fatigue Design of Sintered Connecting Rods. MPR, 1990, 45(6): 408-412.

## SINGLE-SINTERED CON RDDE FOR AUTOMOBILES

**Abstract** Connecting rods are becoming on increasingly high volume market for the powder metallurgy industry. At present the Components are powder forged. Many efforts have been made recently to develop a single-sintered Connecting rod. Within the scope of the European Community's COST 503 program, two cooperative projects were undertaken with Swedish, British and German partners, with the aim of developing single-sintered and weight-optimized connecting rods for reliable operation in 1.8 to 2.0 litre automotive engies. The fatigue strength behaviour obtained with single-sintered connecting rods is equivalent to that of the present used optimized cast connecting rods. The performed engine test runs proved that reliable operation is assured.

**Key Words** single-sintered connecting rod